

超精密飞切机床结合面虚拟材料法建模及模态优化*

魏若程^{①②} 安晨辉^② 王振忠^①

(①厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005; ②中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在超精密飞切加工中, 机床自身的动态特性是引起加工表面微波纹的主导因素。为探究超精密金刚石飞切机床的动态特性及其对加工表面微波纹的影响机理, 将虚拟材料法的结合面建模方法引入整机动力学模型中。进一步地, 利用有限元分析软件进行整机的模态分析及优化。结果表明: 相较于传统的弹簧-阻尼模型, 该模型具有更高的综合精度。同时模态分析表明, 机床固有频率为 268 Hz 的第五阶模态对加工尤为敏感, 而通过适当增加结合面的结合刚度, 可优化机床模态进而消除波纹提高表面质量。

关键词: 飞切机床; 结合面; 动态特性; 虚拟材料; 动力学建模; 波纹度误差

中图分类号: TH161.5 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2019.06.001

Virtual material method modeling and modal optimization for ultra-precision flycutting machine tools

WEI Ruocheng^{①②}, AN Chenhui^②, WANG Zhenzhong^①

(①School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN; ②Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, CHN)

Abstract: In the ultra-precision flycutting, the dynamic performance of the machine tool is the main factor that leads the waviness error on the machined surface. In order to explore the dynamic performance of ultra-precision diamond flycutting machine tool and its influence mechanism on the waviness of the machined surface, the virtual material modeling method was introduced into the whole machine tool. Subsequently, the modal analysis and optimization of the machine tool were carried out by using the finite element analysis software. The results indicate that the virtual material model has higher comprehensive precision than the traditional spring-damper model. Moreover, the modal analysis shows that the fifth mode of the machine tool with natural frequency of 268 Hz is particularly sensitive to processing. By increasing the joint stiffness, the modal of the whole machine tool would could be optimized, so that the surface quality can be improved by eliminating the waviness.

Keywords: flycutting machine tool; dynamic performance; virtual material; dynamic modelling; waviness error

超精密单点金刚石飞切加工技术是精加工磷酸二氢钾(KDP)晶体等软脆、易潮解材料最有效的手段。其一次加工便能形成高精度的光学平面。在强激光光学系统中, 波纹度误差会在下游引入强度调制, 恶化输出的光束质量, 甚至导致下游元件的激光损伤^[1]。但由于切削机床属于复印式加工, 机床自身的动态特性会极大程度地影响波纹度误差^[2-4]。因此, 为提高加工精度, 减小光学元件的波纹度误差, 对机床的动态特性进行探究并优化至关重要。

在机床的动力学中, 机床整体刚度超 60% 及整体

阻尼超 90% 均源自结合面^[5]。故而在动力学的研究中, 结合面建模的准确性决定了整机模型动态特性。最经典的结合面建模方法是弹簧-阻尼法^[6-7], 即在两结合表面之间加入几组弹簧-阻尼单元, 通过定义适当的弹簧和阻尼的参数, 使得模型的动力学表现与实际动力学相似。但由于实际结合面的非线性以及弹簧-阻尼之间的不耦合特性, 限制了弹簧-阻尼法模型精度的提升。为进一步提升模型精度, 发展出了虚拟材料法结合面模型^[8-9]。即在结合面间人为引入一薄层, 该薄层足够薄而对整体动力学影响微乎其微, 而通

* 科学挑战计划(JCKY2016212A506-0504)

过定义该种虚拟材料的材料特性,使其满足模型的动力学特性高度近似于实际结合面。

本文综合考虑了模型的通用性及准确性,将虚拟材料结合面建模方法引入整机模型,建立准确的整机动力学模型。进一步地,基于此模型进行机床模态分析与模态优化。

1 飞切机床的模态分析

1.1 虚拟材料法结合面模型

超精密飞切机床采用了龙门结构,其横梁与立柱、立柱与床身之间均采用螺栓固连,形成4个螺栓固定结合面。结合面的实际接触模型可由图1表示。固定结合面的结合特性受表面形貌、结合面面积、结合面压力、结合部件的密度等共同影响。故而直接建立理论模型具有相当难度且精度无法保证。

利用虚拟材料法建立固定结合面的动力学模型,如图2所示。将两结合表面看作绝对光滑表面,并在其间添加一层虚拟材料层与两表面固连,同时忽略所受压力而将其作用归入材料特性。

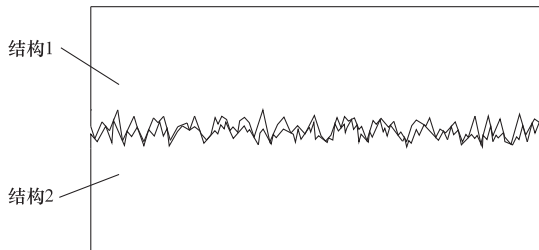


图1 实际接触模型

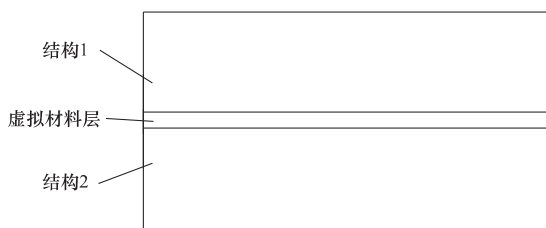


图2 虚拟材料模型

虚拟材料的动力学方程表述为:

$$\left[\begin{pmatrix} M_A \\ M_B \end{pmatrix} + (M_V) \right] \begin{bmatrix} \ddot{x}_A \\ \ddot{x}_B \end{bmatrix} + \left[\begin{pmatrix} C_A \\ C_B \end{pmatrix} + (C_V) \right] \begin{bmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{x}_B \end{bmatrix} + \left[\begin{pmatrix} K_A \\ K_B \end{pmatrix} + (K_V) \right] \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_A \\ F_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_A 、 M_B 及 M_V 分别为结构1、结构2和虚拟材料层的质量矩阵; C_A 、 C_B 及 C_V 分别为它们的阻尼矩阵;

K_A 、 K_B 及 K_V 分别为它们的刚度矩阵; x_A 、 x_B 为结构1和结构2的位移量; F_A 、 F_B 为结构1和结构2所受的力。

采用模态识别手段,识别出结合面的刚度、阻尼等模态信息。跟据式(2)和式(3)将结合面刚度转化为虚拟材料的弹性模量和剪切模量。

$$K_n = \frac{EA}{h} \quad (2)$$

$$K_\tau = \frac{GA}{h} \quad (3)$$

式中: K_n 为拉压刚度; E 为弹性模量; A 为接触面积; h 为虚拟材料层厚度; G 为剪切模量; K_τ 为剪切刚度。

虚拟材料的密度根据两结合部件的密度及螺栓的结合长度而定^[10]:

$$\rho = \frac{\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2}{l_1 + l_2} \quad (4)$$

式中: ρ 为虚拟材料密度; ρ_1 、 ρ_2 分别是结合面两侧结构的密度; l_1 、 l_2 分别为两侧的螺栓结合长度。

结合测定的结合面刚度、阻尼与结合面的受力情况,定义4个结合面虚拟材料均为各向同性材料,泊松比为0.35。左右两横梁-立柱结合面虚拟材料弹性模量分别为10.09 MPa、20.18 MPa;两立柱-床身结合面虚拟材料弹性模量均为8.04 MPa。由于结合面两侧均为大理石材料,故虚拟材料密度为2700 kg/m³。

1.2 整机模态分析

在PTC的Creo软件中建立飞切机床1:1三维模型,并在横梁-立柱以及立柱-床身4个结合面之间添加一层厚度仅为1 mm的薄层结构^[11]。利用Workbench有限元分析软件进行整机的模态分析。定义虚拟材料的材料特性为已求得的各项参数,并且虚拟材料与实际结构之间以“bonded”的形式固连。对导轨和主轴施加弹性支承以模拟液压导轨和气浮主轴的工作条件。分析0~500 Hz的各阶模态,得到其前5阶固有频率和振型,如图3~7所示。

从前五阶的模态分析可以看出,第一阶到第四阶模态中,横梁的振型均表现为在X-Z平面内的运动,进而反映到刀具上振动也仅表现为X-Z平面内的运动,对加工质量影响不明显。而第五阶模态中横梁的振型则表现为绕X轴的旋转,其反映到刀尖上则为Y方向上的运动,其为加工敏感方向,极大影响了加工质量。

进一步地,为考察虚拟材料相较其他模型的精度优势。在同样的机床约束条件下,仅改变结合面的约束方式,分别采用刚性接连法和弹簧-阻尼法来模拟4

个关键结合面并分别进行两组模态分析。在刚性连接模型中,将结合面的两侧结构直接采用“bonded”的形式固连。在弹簧-阻尼模型中,在结合面两侧结构间添加一组弹簧和阻尼器,其参数利用模态测试得到的频响函数通过半功率频带法计算得到。同样得到两组模态分析的前五阶固有频率,与虚拟材料法模型对比如图8所示。

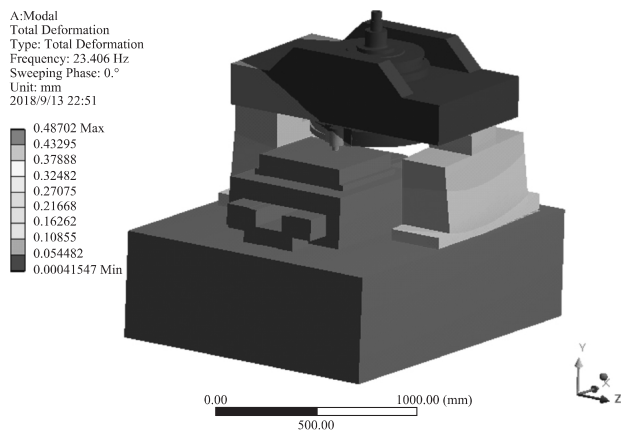


图3 第一阶模态

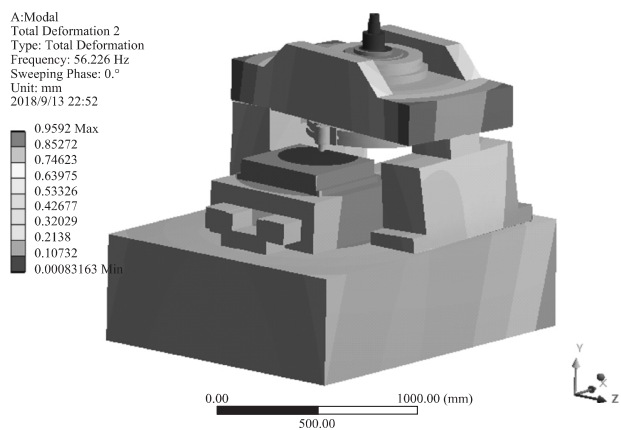


图4 第二阶模态

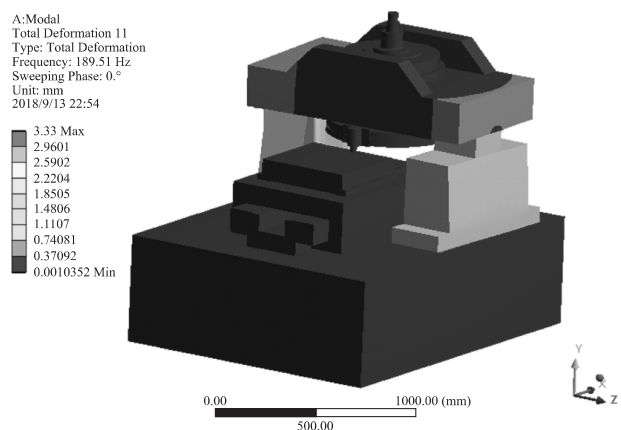


图5 第三阶模态

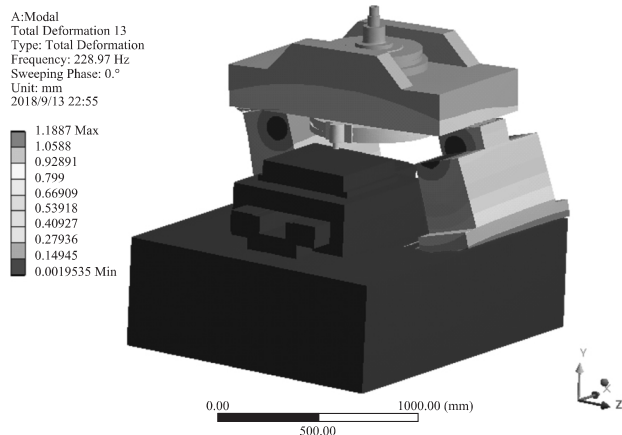


图6 第四阶模态

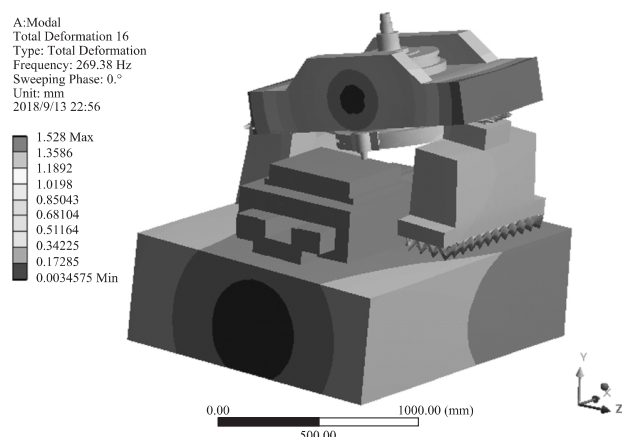


图7 第五阶模态

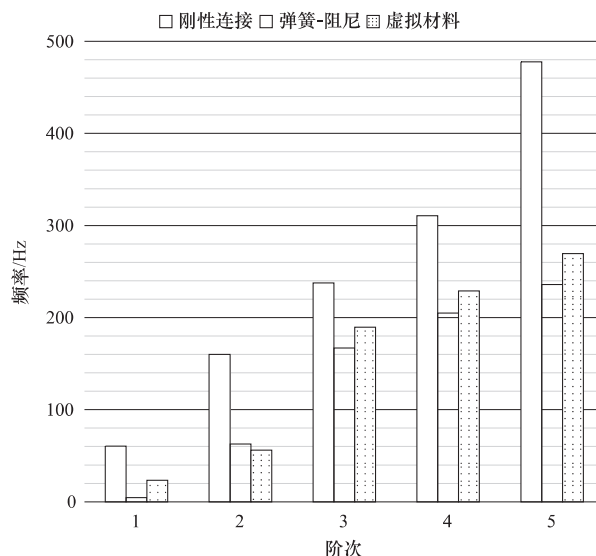


图8 三种模型各阶频率对比

2 整机模态测试

为验证三种仿真模型的准确性,对飞切机床进行整体的模态测试实验。如图9所示,实验装置包括敲



击力锤、加速度传感器、采集器及笔记本电脑。在机床上散布 34 个测量点,采用固定敲击点、移动测量点的模态测试方法。选择敲击点为床身上远离立柱的一角,移动加速度传感器,逐点测量机床,获得每个点的频响函数。通过分析频响函数获得机床的前五阶模态信息如表 1 所示。

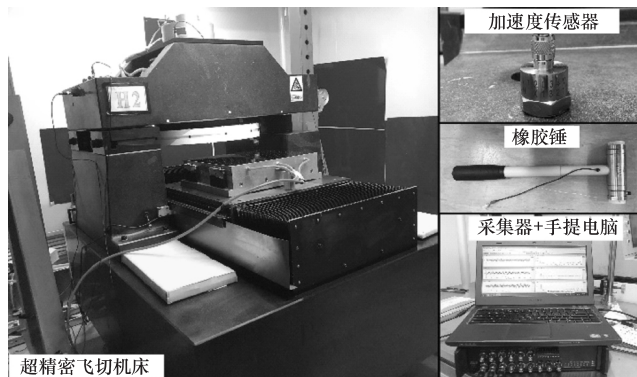


图9 模态测试实验设备

表 1 机床模态信息

阶次	测试频率/Hz	阻尼比/(%)	振型描述
1	20.625	2.87	立柱沿 z 平移
2	53.75	3.84	横梁绕 y 扭转
3	179.375	1.03	立柱沿 x 平移
4	218.25	2.46	立柱 z 向侧倾
5	268.125	0.70	横梁绕 x 扭转

将三组仿真的前五阶固有频率与测试结果进行对比,其误差如图 10 所示。从图中对比分析可知,固有连接模型与实际测试结果相去甚远,因其具有相当大的结合刚度,不宜作为动力学仿真模型。弹簧-阻尼模型有一定参考价值,但各阶精度均不及虚拟材料模型。而采用虚拟材料法的仿真模型具有最高的综合精度,且与实际测试结果十分相近。除第一阶外,其他阶固有频率误差均在 6% 以内,且仿真与测试具有相同的振型,说明采用虚拟材料模型的仿真结果最为可靠。

3 飞切机床的模态优化

结合模态分析与实际加工表面发现,飞切机床的第五阶固有频率为 268 Hz 的模态将引起加工表面约 50 mm 的波纹度误差(主轴转速: 390 r/min,刀盘直径: 630 mm)。为探究结合面刚度对整机模态的影响机理并进行模态优化,对已验证的虚拟材料模型进行优化仿真。

仿真设计如表 2 所示,将已进行模态分析的现状

态机床作为参考组。在此基础上,1~5 组仿真保持立柱-床身结合面刚度不变,逐渐增大横梁-立柱结合面刚度探究其对整体模态的影响。类似地,6~10 组仿真保持横梁-立柱结合面刚度不变,逐渐增大立柱-床身结合面探究其对整体模态的影响。

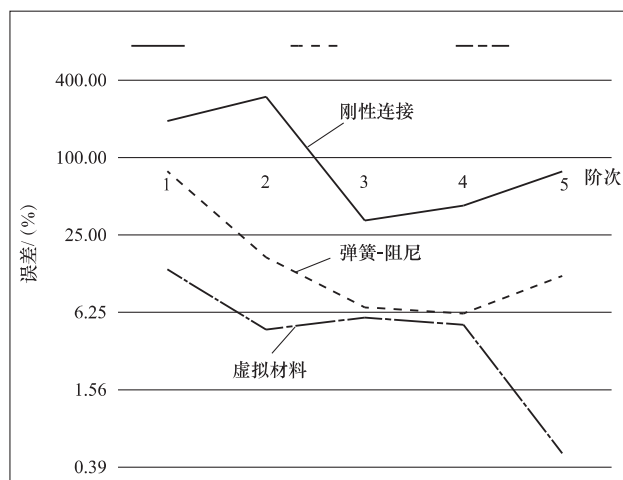


图10 各仿真方法结果对比

表 2 各组仿真结合面虚拟材料弹性模量

仿真组	横梁-立柱/MPa	立柱-床身/MPa
参考组	10.09	8.042
1	20	8.042
2	30	8.042
3	50	8.042
4	70	8.042
5	100	8.042
6	10.09	20
7	10.09	30
8	10.09	50
9	10.09	70
10	10.09	100

在立柱-床身刚度不变情况下,机床的各阶固有频率随横梁-立柱结合面刚度变化如图 11 所示。而在横梁-立柱刚度不变情况下,机床的各阶固有频率随立柱-床身结合面刚度变化如图 12 所示。可以明显看出两组仿真中,各阶固有频率均随着结合面刚度的增大而增大。此外增大立柱-床身结合面刚度的效果要明显大于增大横梁-立柱结合面的刚度。

重点考察对加工敏感的第五阶模态,则要想有效提高机床整体的刚度,可通过增大横梁-立柱与立柱-床身结合面的刚度。其中增大立柱-床身结合面刚度效果优于增大横梁-立柱结合面,而将立柱-床身结合

面刚度对应的弹性模量从 8 MPa 增大到 20 MPa 效果最为明显。

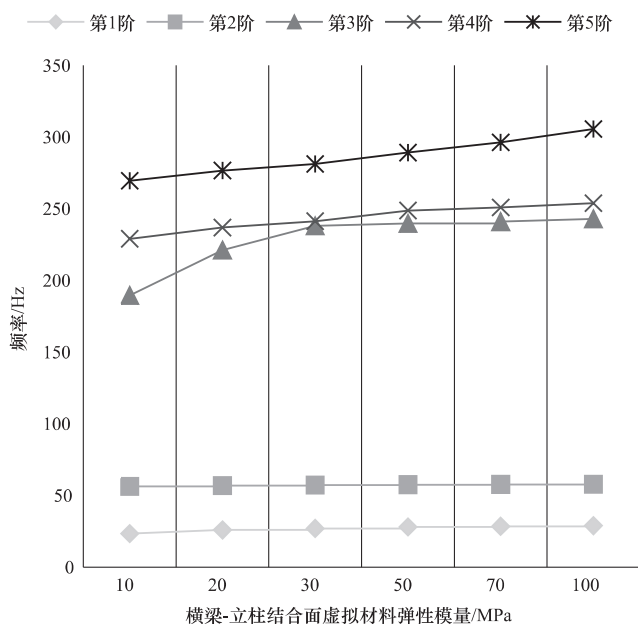


图11 固有频率随横梁-立柱结合面刚度变化

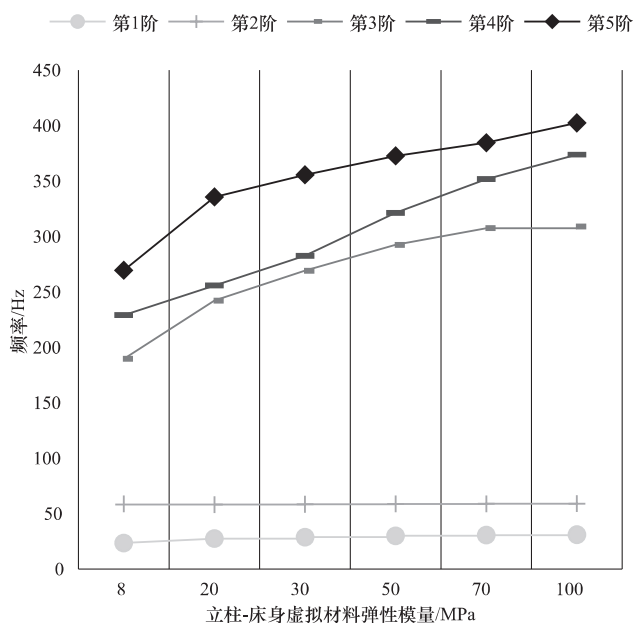


图12 固有频率随立柱-床身结合面刚度变化

在实际应用中,可通过增大连接螺栓的预紧力来增大结合面的刚度。考虑到螺栓的强度极限,可在螺栓强度极限内尽量增大立柱-床身的螺栓预紧力以增大结合面刚度。而顾及横梁-立柱结合面的横梁姿态调节功能,预紧力不可太大,则将横梁-立柱结合面的螺栓预紧力由原本的 30 N·m 增大到 50 N·m。如此一来,则加工出的元件表面不再出现约 50 mm 的微波纹,从而大大提高了元件表面质量。

4 结语

利用虚拟材料法建立飞切机床的整体模型并进行模态分析。结果表明虚拟材料法拥有较高的综合精度。模态分析表明第五阶模态对加工尤为敏感,其固有频率为 268.125 Hz,主要振型表现为横梁的绕 x 向扭转。基于已获得的虚拟材料模型,对飞切机床进行模态优化。结果表明增大横梁-立柱和立柱-床身的结合面刚度有助于提升整体机床刚度。在实际应用中,应尽可能增大立柱-床身结合面刚度并将横梁-立柱结合面螺栓预紧力由 30 N·m 增大到 50 N·m,以达到消除微波纹提高表面质量的目的。

参 考 文 献

- [1] 刁立臣,张克从,常新安. KDP 晶体激光损伤阈值研究的新进展[J]. 人工晶体学报,2002,31(2): 99-103.
- [2] 郭晓光,刘子源,郑桂林,等. KDP 晶体三倍频晶面微视力学行为及加工性能[J]. 光学精密工程,2016,24(2): 398-405.
- [3] 杨旭,安晨辉,孙郅佑,等. 基于机床动态特性的超精密飞切加工表面波纹机理分析[J]. 振动与冲击,2016,35(18): 196-202.
- [4] 张剑锋,苏文虎,张利平. 超精密飞切加工表面微波纹分析研究[J]. 机械工程师,2016(8): 271-273.
- [5] Ren Y, Beards C F. Identification of 'effective' linear joints using coupling and joint identification techniques [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120(2): 331-338.
- [6] Yuji Furukawa, Nobuyuki Moronuki. Contact deformation of a machine tool slideway and its effect on machining accuracy [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1987, 53(485): 228-234.
- [7] 位文明,刘海涛,张俊,等. 基于实际面压力分布的结合面有限元建模方法[J]. 中国科技论文在线,2011,6(8): 563-567.
- [8] Hamid Ahmadian, John E Mottershead, Simon James, et al. Modelling and updating of large surface-to-surface joints in the AWE-MACE structure [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 868-880.
- [9] 范世荣,张学良,温淑花,等. 基于各向同性虚拟材料的固定结合面修正模型[J]. 太原科技大学学报,2017,38(4): 302-306.
- [10] Tian Hongliang, Li Bin, Liu Hongqi, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 239-249.
- [11] 田红亮,刘芙蓉,方子帆,等. 引入各向同性虚拟材料的固定结合部模型[J]. 振动工程学报,2013,26(4): 561-573.

第一作者:魏若程,男,1993年生,硕士研究生,主要研究方向为飞切机床动态特性。

(编辑 孙德茂)

(收稿日期:2019-01-30)

文章编号:190612

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。